

УДК 574.24+ 539.166.3
DOI: 10.7868/S25000640230308

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ РАДИОИЗОТОПОВ ^{85}Sr И ^{54}Mn ВОДОРΟΣЛЯМИ-МАКРОФИТАМИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

© 2023 г. И.С. Усягина¹, Г.М. Воскобойников¹, Д.В. Пуговкин¹,
Д.О. Салахов¹, Г.В. Ильин¹

Аннотация. Экспериментально показана высокая аккумулирующая способность у бурой литоральной макроводоросли северных морей *Fucus vesiculosus* в отношении двух короткоживущих γ -излучающих радионуклидов, ^{85}Sr и ^{54}Mn . Актуальность данных исследований обусловлена распространением техногенных радионуклидов в растениях этого вида в Баренцевом море, наличием потенциальных источников радиоактивности в прибрежье Кольского полуострова и возрастающим вниманием к использованию морских водорослей в различных сферах жизнеобеспечения населения. В лабораторных опытах обнаружено, что исследуемые радионуклиды связываются тканями водорослей. Обратного поступления в водную среду из водорослей поглощенных радиоизотопов в течение эксперимента зарегистрировано не было. Максимальная скорость накопления изотопов у *F. vesiculosus* отмечена в первые сутки проведения эксперимента, ее значение для ^{85}Sr в 2 раза выше, чем для ^{54}Mn . Средняя удельная активность ^{85}Sr в водорослях достигла равновесного значения на шестые сутки экспозиции, а для ^{54}Mn – на вторые сутки экспозиции. Жизнеспособность и функциональная активность растений на протяжении всего эксперимента (14 суток) подтверждалась относительно высоким уровнем интенсивности фотосинтеза и увеличением биомассы талломов фукуса во всех экспериментальных сосудах с добавлениями изотопов ^{85}Sr и ^{54}Mn , а также в контроле.

В процессе опыта выявлена возможность поглощения изотопов ^{85}Sr и ^{54}Mn эпибионтами фукуса и отмершими частицами растений, не влияющая, однако, на результаты эксперимента. Предлагается использовать полученные результаты для прогностических оценок радиоэкологической ситуации при различного рода инцидентах с использованием, хранением и транспортировкой радиоактивных материалов в Баренцевом море, а *F. vesiculosus* – в качестве индикатора радиоактивного загрязнения среды морских экосистем Арктики.

Ключевые слова: водоросли-макрофиты, *Fucus vesiculosus*, Баренцево море, ^{85}Sr , ^{54}Mn , накопление радионуклидов.

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ABSORPTION OF RADIOISOTOPES ^{85}Sr AND ^{54}Mn BY MACROPHYTE ALGAE OF THE BARENTS SEA

I.S. Usyagina¹, G.M. Voskoboinikov¹, D.V. Pugovkin¹, D.O. Salakhov¹, G.V. Ilyin¹

Abstract. The high accumulating capacity of the brown littoral macroalgae of the northern seas *Fucus vesiculosus* in relation to two short-lived gamma-emitting radionuclides ^{85}Sr and ^{54}Mn has been experimentally shown. The relevance of these studies is due to the spread of technogenic radionuclides in plants of this species in the Barents Sea, the presence of potential sources of radioactivity in the coast of the Kola Peninsula and increasing attention to the use of seaweed in various spheres of life support of the population. In laboratory experiments, it was found that the studied radionuclides are strongly bound by algae tissues. No return release

¹ Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17, e-mail: voskoboinikov@mmbi.info

of the absorbed radioisotopes into the aqueous medium was recorded during the experiment. The maximum rate of isotope accumulation in *F. vesiculosus* was noted on the first day of the experiment, its value for ^{85}Sr is twice as high as for ^{54}Mn . The average specific activity of ^{85}Sr in algae reached an equilibrium value on the 6th day of exposure, and for ^{54}Mn on the 2nd day of exposure. The viability and functional activity of plants throughout the experiment (14 days) was confirmed by a relatively high level of photosynthesis intensity and an increase in the biomass of fucus thalloms in all experimental vessels with the addition of isotopes ^{85}Sr and ^{54}Mn , as well as in the control one. During the experiment, the possibility of absorption of isotopes ^{85}Sr and ^{54}Mn by fucus epibionts and dead plant particles was revealed, which, however, does not affect the results of the experiment. It is proposed to use the obtained results for predictive assessments of the radioecological situation in various incidents involving the use, storage and transportation of radioactive materials in the Barents Sea, and *F. vesiculosus* as an indicator of radioactive contamination of the environment of Arctic marine ecosystems.

Keywords: macrophytes, *Fucus vesiculosus*, Barents Sea, ^{85}Sr , ^{54}Mn , accumulation of radionuclides.

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево и Карское моря во второй половине XX века использовали как полигон для сброса отходов эксплуатации атомных силовых установок и захоронения реакторов и контейнеров с радиоактивными отходами. Приблизительная суммарная активность техногенных радионуклидов в отходах составляла около 4,5 ПБк [1]. Разгерметизация захороненных контейнеров создает риск радиоактивного загрязнения арктического шельфа и накопления радионуклидов бентосными организмами на участках выхода радиоактивности. Актуальность исследования биологического поглощения техногенных радионуклидов макроводорослями в прибрежной зоне Баренцева моря обусловлена необходимостью прогнозирования распределения техногенной радиоактивности в случае возможных чрезвычайных ситуаций в местах захоронения и транспортировки радиоактивных отходов.

Накопительную способность высших водных растений по отношению к техногенным радионуклидам исследовали преимущественно в загрязненных техногенными радионуклидами водоемах [2–5]. Для оценки динамики и скорости накопления, а также коэффициентов поглощения отдельных изотопов высшими растениями в водной среде проводили экспериментальные лабораторные работы, в которых использовали воду и водоросли из районов потенциального радиоактивного загрязнения [6–9].

Ранее при изучении радиоактивного загрязнения прибрежья Баренцева моря техногенные радионуклиды были обнаружены в воде, донных отложениях и макрофитах. Выявлено, что по способности накапливать искусственные радионукли-

ды в сообществах литорали северных морей наиболее показательным видом является фукус пузырчатый *Fucus vesiculosus* [10–12]. Прикрепленные обитатели литорали являются естественными биофильтрами на границе раздела сред – наземной и морской, водной среды и донных осадков. Широкий диапазон толерантности к целому комплексу факторов [13] позволяет использовать этот вид в качестве индикатора радиоактивного загрязнения среды морских экосистем Арктики [14].

В настоящей работе сделана попытка в лабораторных условиях оценить накопительную способность данного вида к двум короткоживущим техногенным γ -излучающим радионуклидам, ^{85}Sr и ^{54}Mn , определить скорость их поглощения растением, а также коэффициенты накопления. При выборе радионуклидов для эксперимента учитывали, что в исследованиях, проведенных ранее на других растениях и для других широт, была обнаружена высокая степень активности их поглощения и быстрый перенос в тканях растений в результате метаболических и неметаболических процессов. Марганец – один из самых распространенных химических элементов в литосфере. При высоких и токсичных уровнях его содержания в растворе может происходить пассивная адсорбция этого элемента гидробионтами [15]. Из изотопов марганца опасность могут представлять продукты деления ядерного топлива и продукты активации примесей теплоносителя, мигрировавшие в воздушную среду, такие как ^{56}Mn и ^{54}Mn [16]. Попадание аэрозолей, содержащих радиоизотопы марганца, в морскую среду может оказать негативное влияние на жизнедеятельность гидробионтов. Стронций – один из основных потенциально опасных радионуклидов вследствие сохраняющейся возможности аварий-

ного загрязнения в местах дампинга радиоактивных отходов. Наибольший токсикологический интерес представляют β -излучатели ^{89}Sr , ^{90}Sr [17]. Согласно литературным данным изотопы стронция в опытах по накоплению радионуклидов водорослями показывают сходные результаты [18], поэтому в настоящей работе использовали ^{85}Sr , который является γ -излучателем и соответствует возможностям имеющейся приборной базы, на которой построено исследование.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Растения и воду для экспериментов отбирали в апреле 2023 г. в относительно чистом районе Кольского залива Баренцева моря – на побережье у пос. Абрам-мыс ($68^{\circ}58'42''$ с.ш., $33^{\circ}01'09''$ в.д.). Многолетний радиоэкологический мониторинг показал, что вода и водоросли-макрофиты в этом районе не загрязнены короткоживущими техногенными радионуклидами, в них обнаруживали лишь следовые количества среднеживущих ^{137}Cs и ^{90}Sr , наличие которых характерно для северных морей после испытаний ядерного оружия в середине XX века и сбросов радиоактивных отходов российскими и западноевропейскими предприятиями атомной промышленности [12]. Перед проведением эксперимента на γ -спектрометре был измерен фон γ -активности в отобранных пробах морской воды и водорослей. Удельная активность техногенных радионуклидов в пробах была меньше минимально детектируемой активности.

Для экспериментов использовали распространенный в северных морях вид водорослей-макрофитов – фукус пузырчатый. Перед началом опытов водоросли тщательно промывали, чтобы удалить поверхностно адсорбированные частицы донного осадка, которые могут быть причиной искажений при расчете количественных показателей поглощения радионуклидов из раствора. Водоросли акклиматизировали в течение 5 суток к лабораторным условиям в 1-литровом аквариуме. Характеристики среды в эксперименте соответствовали таковым в естественных условиях: температура воды поддерживалась с помощью термостата равной $6-7^{\circ}\text{C}$, соленость – 30 ‰, фотопериод – 24/0, морская вода аэрировалась. После периода акклиматизации растения помещали в подготовленные для опыта стеклянные сосуды с водой объемом 1 л. Перед постановкой опыта воду фильтровали че-

рез ватно-марлевый фильтр для удаления крупной взвеси. Для удаления из воды микровзвеси и микроорганизмов (фито-, зоо-, бактериопланктона) воду дополнительно фильтровали через нитроцеллюлозный мембранный фильтр (Millipore) с размером пор $0,2$ мкм.

Эксперименты с фукусом пузырчатым проводили в трех повторностях. Для анализа поглощения ^{85}Sr в три сосуда помещали талломы водорослей с сырой массой в среднем по $38,3 \pm 4,6$ г. Для анализа поглощения ^{54}Mn в три сосуда помещали талломы водорослей с сырой массой в среднем по $37,9 \pm 7,5$ г. Сухую массу растений определяли взвешиванием после высушивания до постоянного показателя. Пересчет на сухую массу осуществляли с помощью построения калибровочной регрессии. Основные показатели накопления радионуклидов растениями рассчитывали на единицу сухой массы. Радионуклиды ^{85}Sr и ^{54}Mn вносили в воду в виде растворов хлорида стронция-85 в $0,5\text{M}$ соляной кислоте и хлорида марганца-54 в $0,5\text{M}$ соляной кислоте, активность которых составляла $0,96 \pm 0,01$ и $0,43 \pm 0,01$ кБк/л соответственно. Образцы изотопов (масса каждого раствора составляла около 10 мл) произведены ЗАО «Ритверц» (Санкт-Петербург, Россия). После внесения радионуклидов в контрольных и опытных сосудах pH среды восстанавливали до исходного значения ($\text{pH} = 7$) 1N -м раствором NaOH. Время проведения опыта – 14 суток. Перед внесением талломы водорослей в каждую экспериментальную емкость растворы ^{85}Sr и ^{54}Mn уравнивали в течение 24 ч при температуре $6-7^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальные и контрольные емкости экспонировали в термостатируемом боксе при температуре $6-7^{\circ}\text{C}$ и постоянном освещении $16-18$ Вт/м².

Тестирование жизнеспособности талломы *F. vesiculosus* проводили методом измерения фотосинтетической активности трижды в течение эксперимента: в первые, пятые и четырнадцатые сутки экспозиции. Кроме этого, ежедневно осуществляли визуальный контроль растений на предмет появления некротических пятен на поверхности таллома.

Удельную активность ^{85}Sr и ^{54}Mn в растениях и воде измеряли на портативном γ -спектрометре InSpector-2000 фирмы Canberra (США) со сверхчистым германиевым детектором под свинцовым защитным экраном, позволяющим измерять γ -спектр в диапазоне энергии от 50 до 3000 кэВ с

относительной эффективностью 15 %. Энергетическое разрешение по линии 1332 КэВ ^{60}Co составляет 1,79 КэВ, по линии изотопа ^{57}Co 122 КэВ – 0,78 КэВ. Обработка γ -спектров выполнена с помощью программного обеспечения CANBERRA Genie-2000 (США). Измерения активности ^{85}Sr и ^{54}Mn в растениях и воде проводили в стандартной геометрии «маринелли» следующим образом: сначала измеряли активность растения, погруженного в определенный объем воды, а затем измеряли активность ^{85}Sr и ^{54}Mn в воде. Для определения удельной активности ^{85}Sr и ^{54}Mn в растениях активность воды вычитали.

Коэффициент накопления ^{85}Sr и ^{54}Mn (K_n) рассчитывали как отношение содержания радионуклида в сухой биомассе растений (Бк/кг) к содержанию радионуклида в воде (Бк/л).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В опыте динамика удельной активности ^{85}Sr и ^{54}Mn в растениях имела вид кривой с насыщением и выходом на плато (рис. 1). Активность радионуклида в биомассе растений после выхода кривой на плато мы называем равновесной, поскольку активности ^{85}Sr и ^{54}Mn в растениях и водной среде на этой стадии остаются относительно постоянными величинами. Достижение равновесной активности ^{85}Sr и ^{54}Mn в растениях происходило неодинаково. Так, средняя удельная активность ^{85}Sr в водорослях достигла равновесного значения на шестые сутки экспозиции (рис. 1) и сохранялась в течение последующих 8 суток до конца эксперимента равной $65,6 \pm 0,7$ кБк/кг сухой массы. Активность ^{85}Sr в

воде, наоборот, снизилась с $0,96 \pm 0,01$ кБк/л до равновесной, равной $0,31 \pm 0,02$ кБк/л (табл. 1).

Средняя удельная активность ^{54}Mn в биомассе достигла равновесного значения на вторые сутки (рис. 1) и сохранялась до конца эксперимента равной $43,8 \pm 0,9$ кБк/кг сухой массы. В водной среде активность ^{54}Mn снизилась с $0,43 \pm 0,01$ кБк/л до равновесной, равной $0,001 \pm 0,00003$ кБк/л (табл. 1).

Визуальные наблюдения в течение 14 суток эксперимента показали, что опытные и контрольные образцы сохраняли жизнеспособный вид, их морфологическая структура не была нарушена, некротических пятен и деструкции таллома не отмечалось. Одним из главных показателей функционального состояния растительных организмов является фотосинтетическая активность. Анализ фотосинтеза у *F. vesiculosus* выявил его высокий уровень у всех исследуемых образцов в первые сутки эксперимента – до $0,26$ мкг $\text{O}_2/\text{г}$ сырой массы в час (рис. 2). На пятые и четырнадцатые сутки опыта наблюдалось постепенное снижение фотосинтетической активности контрольных талломов фукуса в 2 и в 3 раза соответственно. В опытных сосудах с изотопом ^{85}Sr на пятые сутки экспозиции интенсивность фотосинтеза (ИФ) была выше, чем в контроле, на 23 %. В сосудах с ^{54}Mn показатель ИФ оставался равным значению в контроле. В конце эксперимента, на четырнадцатые сутки экспозиции, ИФ в сосудах с радионуклидами ^{85}Sr и ^{54}Mn была в 2 раза выше по сравнению с контролем. Можно констатировать, что к концу эксперимента в контрольных сосудах у водорослей ИФ при постоянном равномерном снижении уменьшилась до 30 % от исходного показателя. У водорослей, которые подвергались воздей-

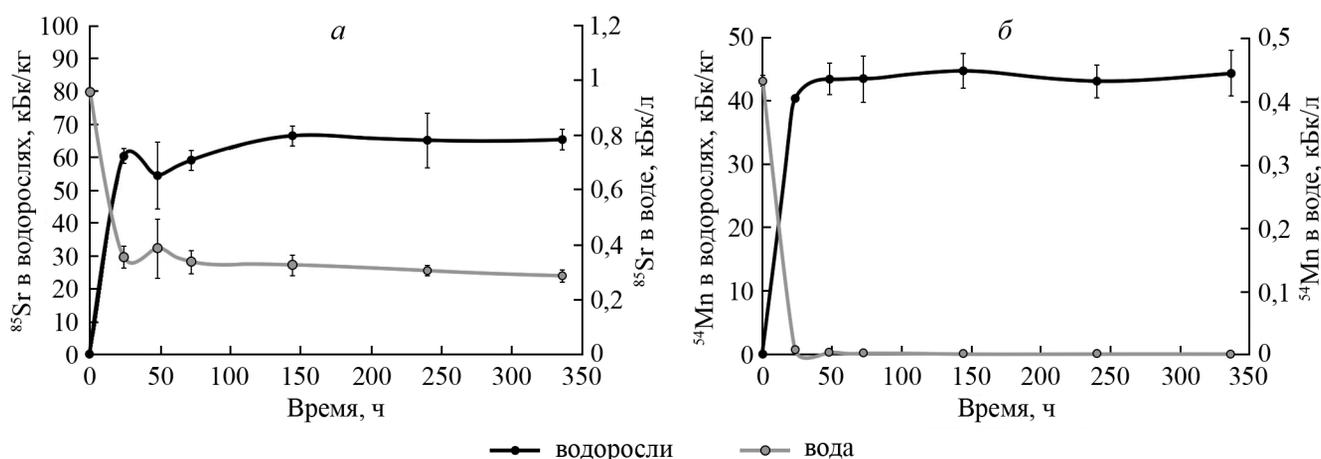


Рис. 1. Временная динамика удельной активности ^{85}Sr (а) и ^{54}Mn (б) в водорослях и в воде.
Fig. 1. Time dynamics of specific activity of ^{85}Sr (a) and ^{54}Mn (b) in algae and in the water.

Таблица 1. Параметры накопления ^{85}Sr и ^{54}Mn *F. vesiculosus* Баренцева моря в лабораторном эксперименте
Table 1. Parameters of accumulation of ^{85}Sr and ^{54}Mn *F. vesiculosus* of the Barents Sea in the laboratory experiment

Радионуклид Radionuclide	Равновесная активность Equilibrium activity		Максимальная скорость аккумуляции, Бк/кг/ч / Maximum accumulation rate, Bk/kg/h	Коэффициент накопления K_H / Accumulation coefficient K_A
	в водорослях, кБк/кг сухой массы / in algae, kBq/kg d.w.	в воде, кБк/л in water, kBq/l		
^{85}Sr	$65,6 \pm 0,7$	$0,31 \pm 0,02$	2,5	68,6
^{54}Mn	$43,8 \pm 0,9$	$0,001 \pm 0,00003$	1,7	101,7

ствию радионуклидов ^{85}Sr и ^{54}Mn , интенсивность фотосинтеза стабилизировалась после пяти суток экспозиции на уровне 50–60 % от исходного значения (рис. 2).

Кроме визуальных наблюдений и оценки ИФ проведены взвешивания талломов водорослей в опытных и контрольных сосудах. Результаты представлены в таблице 2. После окончания 14-дневного эксперимента наблюдалось увеличение сырой массы всех образцов фукуса в опытах с растворами ^{85}Sr и ^{54}Mn , а также в одном из контрольных сосудов. Это подтверждает жизнеспособность водорослей и их рост в лабораторных условиях в течение всего опыта. В одном из контрольных образцов не было обнаружено увеличения сырой массы, а также зафиксировано снижение ИФ, однако отсутствие морфологических нарушений и некротических пятен свидетельствует о том, что во время проведения эксперимента растение было жизнеспособно.

Сухую массу растений после окончания опыта использовали для расчета коэффициентов накопления исследуемых радионуклидов. На ос-

новании полученных данных было вычислено, что у *F. vesiculosus* в экспериментальных условиях коэффициент накопления ^{54}Mn (101,7) выше, чем ^{85}Sr (68,6) (табл. 1).

Полученные данные по ^{54}Mn согласуются с результатами аналогичного опыта, проведенного на водорослях этого же вида, обитающих в Северном море на глубине 2 м. В указанном опыте коэффициент накопления ^{54}Mn у водорослей после 12 суток экспозиции в растворе морской воды ($S = 34 \%$, $T = 2 \text{ }^\circ\text{C}$) с удельной активностью 6,75 кБк/л составлял 92 [7].

В проведенном нами эксперименте за 48 часов практически вся внесенная в воду активность ^{54}Mn перешла в растение, и в последующие 12 суток обратного выхода этого радионуклида в воду не наблюдалось. Вероятно, это связано с включением радиоактивного марганца в метаболические обменные фонды водоросли. Другая часть изотопа принимает участие в формировании квантово-биохимического остова (пигменты, ферменты), по которому движется цепь электронов, протонов [18]. Максимальная скорость накопления, 1,7 Бк/кг/ч, определена в первые сутки эксперимента.

Рассчитанный нами коэффициент накопления ^{85}Sr сравнивали с данными по накоплению ^{89}Sr *F. vesiculosus* с Западного Мурмана (морское побережье Кольского полуострова) [6]. Равновесный коэффициент накопления ^{89}Sr водорослью после восьми суток экспозиции в растворе морской воды ($S = 34,25 \%$, $T = 2-5 \text{ }^\circ\text{C}$) с удельной активностью 0,66 кБк/л составлял 43. В проведенном нами эксперименте коэффициент накопления ^{85}Sr у фукуса оказался в 2 раза выше. Необходимо отметить, что при достижении равновесной концентрации не вся внесенная в воду активность ^{85}Sr была поглощена растением, приблизительно 1/3 часть осталась в среде. Максимальная скорость накопления, 2,5 Бк/кг/ч, наблюдалась в первые сутки эксперимента. После достижения равновесной активности в воде не наблюдалось выхода погло-

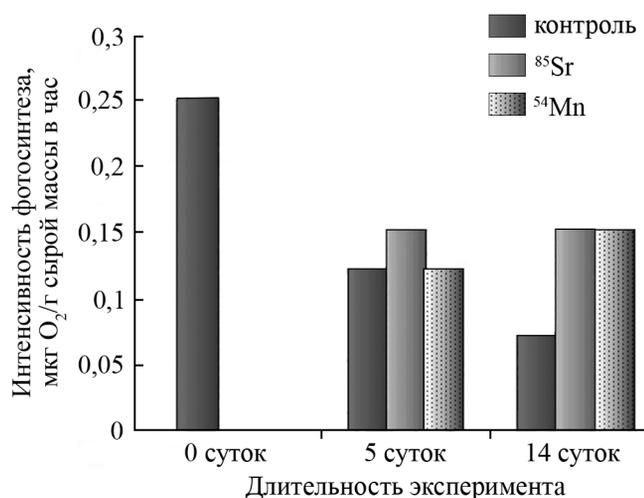


Рис. 2. Фотосинтетическая активность *F. vesiculosus* в контрольных и опытных сосудах в течение эксперимента.

Fig. 2. Photosynthetic activity of *F. vesiculosus* in control and experimental vessels during the experiment.

Таблица 2. Изменения массы экспериментальных и контрольных проб водорослей (18.04–03.05.2023)
Table 2. Changes in the masses of experimental and reference sample algae (18 April – 3 May 2023)

Повторность Replication	Начальная сырая масса водорослей, г, 18.04.2023 / Raw mass of algae at the beginning of the experiment, g, 18 April 2023	Сырая масса водорослей по окончании опыта, г, 03.05.2023 / Raw mass of algae at the end of the experiment, g, 3 May 2023	Сухая масса водорослей по окончании опыта, г / Dry mass of algae at the end of the experiment, g	Коэффициент содержания влаги, k / Moisture content coefficient, k
^{85}Sr				
I	37,4	42,5	8,8	4,8
II	43,9	49,4	9,9	5,0
III	38,9	50,6	8,9	5,7
Среднее / Average	40,1	47,5	9,2	5,2
Контроль / Control	32,8	31,4	8,0	4,3
^{54}Mn				
I	39,6	45,6	9,0	5,0
II	41,4	48,2	9,9	4,9
III	42,3	48,7	10,0	4,9
Среднее / Average	41,1	47,5	9,6	4,9
Контроль / Control	28,3	31,2	7,3	4,3

щенного растением радионуклида в воду. Полученный результат можно объяснить тем, что процесс накопления стронция водорослями-макрофитами частично происходит не метаболическим путем, в основе которого лежат механизмы диффузии и сорбции. Стронций может находиться в неметаболических обменных фондах растения, которые принято в физиологии растений называть свободным или кажущимся свободным пространством ткани или клетки [19]. Немегаболические обменные фонды, очевидно, не выполняют существенной физиологической функции [18]. Вероятно, поэтому в течение эксперимента не наблюдалось снижения ИФ растений.

В ходе эксперимента в воду с поверхности водоросли (в том числе и за счет дополнительной аэрации) поступали эпибионты, а также детрит. Для определения активности ^{85}Sr и ^{54}Mn , накопившихся в этих эпибионтах и детрите, воду после извлечения из нее водорослей (через 14 дней) повторно фильтровали через мембранный фильтр (0,22 мкм). Активность изотопов измеряли в профильтрованной воде и осевших на фильтрах детрите и эпибионтах. Результаты измерений показали, что активность ^{85}Sr на фильтрах составляла 0,95 Бк, а ^{54}Mn – 1,26 Бк. В профильтрованной воде содер-

жалось 0,3 кБк/л ^{85}Sr и 0,0005 кБк/л ^{54}Mn . Из этого следует, что кроме накопления исследуемых изотопов живыми растениями происходит поглощение ^{85}Sr и ^{54}Mn эпибионтами и отмершими частицами растений. Однако значимого влияния на общий результат эксперимента указанное явление не оказывает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали высокую аккумулярующую способность *F. vesiculosus* в отношении ^{85}Sr и ^{54}Mn , что подтверждается данными по содержанию техногенных радионуклидов в водорослях этого вида в Баренцевом море [10–12]. В лабораторных опытах обнаружено, что исследуемые радионуклиды прочно связывались талломами водорослей, и не было зарегистрировано их прижизненного выхода в воду. Максимальная скорость накопления изотопов отмечена в первые сутки проведения эксперимента, ее значение для ^{85}Sr в 2 раза выше, чем для ^{54}Mn . Средняя удельная активность ^{85}Sr в биомассе достигла равновесного значения на шестые сутки, ^{54}Mn – на вторые сутки эксперимента. Рост талломов и интенсивность фотосинтеза во всех повторностях опытов с растворами ^{85}Sr и ^{54}Mn и в контрольных сосудах подтверждают

жизнеспособность водорослей на протяжении всего эксперимента, продолжавшегося 14 суток.

Выявлено, что часть радионуклидов ^{85}Sr и ^{54}Mn в процессе эксперимента поглощается эпибионтами и отмершими частицами растений, однако незначительное количество активности, поглощенное этими субстанциями, не искажает общих результатов эксперимента.

Полученные результаты могут быть востребованы для прогностических оценок радиозкологической ситуации при различного рода инцидентах с использованием радиоактивных материалов, а бу-

рая водоросль *Fucus vesiculosus* весьма перспективна в качестве индикатора радиоактивного загрязнения среды морских экосистем Арктики.

Работа выполнена по теме Российского научно-фонда 22-17-00243 «Радиационная океанология и геоэкология прибрежного шельфа Баренцева и Белого морей. Биокосные взаимодействия в системе: донные отложения – вода – макроводоросли – микроорганизмы, их роль в ремедиации морской прибрежной экосистемы при радиационном и химическом загрязнении в условиях Арктики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aarkrog A. 1994. Radioactivity in polar regions – Main sources. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 21–35. doi: 10.1016/0265-931x(94)90005-1
- Поликарпов Г.Г. 1964. *Радиоэкология морских организмов*. М., Атомиздат: 295 с.
- Зотина Т.А. 2009. Распределение техногенных радионуклидов в биомассе макрофитов реки Енисей. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 49(6): 729–737.
- Strezov A., Nonova T. 2009. Influence of macroalgal diversity on accumulation of radionuclides and heavy metals in Bulgarian Black Sea ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 100(2): 144–150. doi: 10.1016/j.jenvrad.2008.09.007
- Nonova T., Tosheva Z. 2014. Cesium and strontium in Black Sea macroalgae. *Journal of Environmental Radioactivity*. 129: 48–56. doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.12.004
- Злобин В.С. 1966. Накопление радиоактивного стронция морскими бурьями водорослями. *Гигиена и санитария*. 12: 86–88.
- Boisson F., Hutchins D.A., Fowler S.W., Fisher N.S., Teysse J.-L. 1997. Influence of temperature on the accumulation and retention of 11 radionuclides by the marine alga *Fucus vesiculosus* (L.). *Marine Pollution Bulletin*. 35(7–12): 313–321. doi: 10.1016/s0025-326x(97)00092-1
- Topcuoğlu S. 2001. Bioaccumulation of cesium-137 by biota in different aquatic environments. *Chemosphere*. 44(4): 691–695. doi: 10.1016/s0045-6535(00)00290-3
- Bolsunovsky A., Zotina T., Bondareva L. 2005. Accumulation and release of ^{241}Am by a macrophyte of the Yenisei River (*Elodea canadensis*). *Journal of Environmental Radioactivity*. 81(1): 33–46. doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.10.012
- Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Намятов А.А., Зуев А.Н., Кириллова Е.А. 1997. Радионуклиды в экосистемах залива и прилегающих акваторий. В кн.: *Кольский залив: океанография, биология, экосистемы, поллютанты*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 208–244.
- Матишов Г.Г., Матишов Д.Г. 2001. *Радиационная экологическая океанология*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 417 с.
- Матишов Д.Г., Касаткина Н.Е., Усягина И.С., Павельская Е.В., Дерябин А.А. 2009. Искусственные радионуклиды в экосистеме. В кн.: *Кольский залив: освоение и рациональное природопользование*. М., Наука: 318–332.
- Воскобойников Г.М., Макаров М.В., Рыжик И.В., Малавенда С.В. 2007. Влияние абиотических факторов на структуру фитоценозов, морфологические и физиологические особенности водорослей-макрофитов Баренцева моря. В кн.: *Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России*. Владивосток, Дальнаука: 357–386.
- Fowler S.W. 1979. Use of macroalgae as a reference material for pollutant monitoring and specimen banking. In: *Monitoring Environmental Materials and Specimen Banking: Proceedings of the International Workshop, Berlin (West), 23–28 October 1978*. Netherlands, Springer: 247–261. doi: 10.1007/978-94-009-8843-9
- Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. 1986. *Морская динамическая радиоэкология*. М., Энергоатомиздат: 176 с.
- Новый справочник химика и технолога. Радиоактивные вещества. Вредные вещества. Гигиенические нормативы*. 2004. СПб., Проффессионал: 1142 с.
- Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С., Нисимов П.Г., Парфенова И.М., Тищенко Г.С., Цапков М.М. 2012. *Радиобиология инкорпорированных радионуклидов*. М., изд-во Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России: 464 с.
- Морская радиоэкология*. 1970. Киев, Наукова думка: 276 с.
- Сатклифф Дж.Ф. 1964. Поглощение минеральных солей растениями. М., Мир: 222 с.

REFERENCES

- Aarkrog A. 1994. Radioactivity in polar regions – Main sources. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 21–35. doi: 10.1016/0265-931x(94)90005-1
- Polikarpov G.G. 1964. *Radioekologiya morskikh organizmov*. [Radioecology of marine organisms]. Moscow, Atomizdat: 295 p. (In Russian).
- Zotina T.A. 2009. [The distribution of artificial radionuclides in the biomass of macrophytes of the Yenisei River]. *Radiatsionnaya biologiya, radioecologiya*. 49(6): 729–737. (In Russian).
- Strezov A., Nonova T. 2009. Influence of macroalgal diversity on accumulation of radionuclides and heavy metals in Bulgarian Black Sea ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 100(2): 144–150. doi: 10.1016/j.jenvrad.2008.09.007

5. Nonova T., Tosheva Z. 2014. Cesium and strontium in Black Sea macroalgae. *Journal of Environmental Radioactivity*. 129: 48–56. doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.12.004
6. Zlobin V.S. 1966. [Accumulation of radioactive strontium by marine brown algae]. *Gigiena i sanitariya*. 12: 86–88. (In Russian).
7. Boisson F., Hutchins D.A., Fowler S.W., Fisher N.S., Teysse J.-L. 1997. Influence of temperature on the accumulation and retention of 11 radionuclides by the marine alga *Fucus vesiculosus* (L.). *Marine Pollution Bulletin*. 35(7–12): 313–321. doi: 10.1016/s0025-326x(97)00092-1
8. Topcuoğlu S. 2001. Bioaccumulation of cesium-137 by biota in different aquatic environments. *Chemosphere*. 44(4): 691–695. doi:10.1016/s0045-6535(00)00290-3
9. Bolsunovsky A., Zotina T., Bondareva L. 2005. Accumulation and release of ²⁴¹Am by a macrophyte of the Yenisei River (*Eloдея canadensis*). *Journal of Environmental Radioactivity*. 81(1): 33–46. doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.10.012
10. Matishov G.G., Matishov D.G., Namyatov A.A., Zuev A.N., Kirillova E.A. 1997. [Radionuclides in the ecosystems of the bay and adjacent sea areas]. In: *Kol'skiy zaliv: okeanografiya, biologiya, ekosistemy, pollyutanty*. [The Kola Bay: oceanography, biology, ecosystems, pollutants]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 208–244. (In Russian).
11. Matishov G.G., Matishov D.G. 2001. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya*. [Radiation ecological oceanology]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 417 p. (In Russian).
12. Matishov D.G., Kasatkina N.E., Usyagina I.S., Pavel'skaya E.V., Deryabin A.A. 2009. [Artificial radionuclides in the ecosystems]. In: *Kol'skiy zaliv: osvoenie i ratsional'noe prirodopol'zovanie*. [Kola Bay: development and rational use of natural resources]. Moscow, Nauka: 318–332. (In Russian).
13. Voskoboinikov G.M., Makarov M.V., Ryzhik I.V., Malavenda S.V. 2007. [Influence of abiotic factors on the structure of phytocenoses, morphological and physiological features of macrophyte algae in the Barents Sea]. In: *Dinamika morskikh ekosistem i sovremennye problemy sokhraneniya biologicheskogo potentsiala morey Rossii*. [Dynamics of marine ecosystems and current problems of conservation of the biological potential of the Russian seas]. Vladivostok, Dalnauka: 357–386. (In Russian).
14. Fowler S.W. 1979. Use of macroalgae as a reference material for pollutant monitoring and specimen banking. In: *Monitoring Environmental Materials and Specimen Banking: Proceedings of the International Workshop, Berlin (West), 23–28 October 1978*. Netherlands, Springer: 247–261. doi: 10.1007/978-94-009-8843-9
15. Polikarpov G.G., Egorov V.N. 1986. *Morskaya dinamicheskaya radiokhemoekologiya*. [Marine dynamic radio-chemoecology]. Moscow, Energoatomizdat: 176 p. (In Russian).
16. *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Radioaktivnye veshchestva. Vrednye veshchestva. Gigienicheskie normativy*. [New handbook of chemist and technologist. Radioactive substances. Harmful substances. Hygienic standards]. 2004. St Petersburg, Professional: 1142 p. (In Russian).
17. Kalistratova V.S., Belyaev I.K., Zhorova E.S., Nisimov P.G., Parfenova I.M., Tishchenko G.S., Tsapkov M.M. 2012. *Radiobiologiya inkorporirovannykh radionuklidov*. [Radiobiology of incorporated radionuclides]. Moscow, A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia: 464 p. (In Russian).
18. *Morskaya radioekologiya*. [Marine radioecology]. 1970. Kiev, Naukova dumka: 276 p. (In Russian).
19. Sutcliffe J.F. 1964. *Pogloshchenie mineral'nykh soley rasteniyami*. [Mineral salts absorption in plants]. Moscow, Mir: 222 p. (In Russian).

Поступила 13.06.2023